[1]左侧角回在词汇语义加工中的作用

张向阳 王小娟* 杨剑峰*

(陕西师范大学心理学院，西安 710062)

摘 要：大脑左侧角回是语言认知神经科学研究发现的一个重要语义加工脑区。该脑区在词汇语义加工中的具体功能还没有得到统一的认识，成为研究者广泛关注的热点和焦点问题。结构上，角回位于颞叶、枕叶和顶叶交接区，并且具有广泛的白质纤维束连接，这决定了它可能具有跨区域信息整合的功能。它在高水平语义表征、模态和特征信息联合表征、语义关系表征以及语义整合加工中参与激活，可能是语义表征和加工的信息“聚合区”。然而，左侧角回在语义表征枢纽、语义执行控制加工、默认模式网络的语义加工三方面还存在功能争论，未来研究需要综合考虑左侧角回的解剖结构基础及其与广泛脑区连接的特点，对角回子区域的功能进行深入细致地探讨。

关键词：左侧角回，语义表征，语义加工，聚合区

分类号：B842

1 引言

大脑左侧角回作为语义加工的一个重要脑区，得到了大量来自脑损伤病人研究(Jefferies & Lambon Ralph, 2006)、神经影像(详见综述，Binder et al., 2009)以及基于神经调控技术的虚拟损伤研究(Croce et al., 2021; Seghier, 2022)的证据支持。研究者从语义表征、语义通达加工、语义控制以及默认模式网络的语义加工等不同领域的研究问题出发，对角回的功能认识也就不同。从而，探讨左侧角回在语义加工中的功能成为研究者广泛关注的热点和焦点问题。

在解剖结构上，左侧角回位于颞叶、枕叶和顶叶交接区，并且具有广泛的白质纤维束连接，这决定了它可能具有跨区域信息整合的功能。一方面，左侧角回毗邻视觉、听觉、躯体感觉和空间信息加工的枕颞顶叶脑区，它和这些感知-运动皮层之间存在广泛的结构连接。具体表现为左侧角回通过弓状束与视觉、听觉和操作信息加工的颞叶脑区连接，通过上纵束的一部分与操作信息加工的顶叶皮层连接(Bonner et al., 2013)。另一方面，左侧角回与其他语言加工脑区之间也存在丰富的结构连接(Niu & Palomero-Gallagher, 2023; Seghier, 2013)。例如，左侧角回通过上纵束与额叶脑区形成背侧连接通路(Petit et al., 2023; Vavassori et al., 2021)，通过下纵束的腹侧通路连接到额叶皮层(Petit et al., 2023; Sarubbo et al., 2013)，还通过弓状束与额中回和额下回相连接(Nakajima et al., 2020; Yakar et al., 2023)，构成了角回参与额-顶叶网络的结构基础，这一额顶叶网络在语义控制中起着至关重要的作用(Xu et al., 2017)。而且，左侧角回与颞叶脑区也具有广泛的结构连接，它通过弓状束与颞中回、前颞上回相连(Turken & Dronkers, 2011)，通过中纵束与

收稿日期：2023-07-19

*本文系国家自然科学基金(项目编号：31671167), 中央高校基本科研业务费专项资金(项目编号：GK202101010, 2018TS083) 的研究成果之一。

通信作者：王小娟, E-mail: wangxj@snnu.edu.cn

杨剑峰, E-mail: yangjf@snnu.edu.cn

负责语义表征和存储的颞极和颞叶后部脑区建立连接(Frey et al., 2008; Makris et al., 2009; Yakar et al., 2023)。另外，左侧角回还通过 U 形束连接临近的颞叶、顶叶和枕叶皮层，其中包括颞上回、枕上回、枕中回、缘上回和顶上回脑区，这些短程皮质连接在视觉刺激的语义加工中发挥作用(Guevara et al., 2020)。

左侧角回与广泛语言加工脑区具有的结构连接，可能决定了它在语义加工中的核心作用。在跨通道、跨神经网络的多维信息聚合/整合加工中都发现了左侧角回的激活，其功能可能是词汇语义加工的信息“聚合区”。

2 左侧角回在语义表征中的“聚合”功能

“聚合区”是研究者在关于大脑如何进行概念创造和表征的模型中提出的，左侧角回等多模态皮层被认为是感知觉-运动-情感模态信息的聚合区(Damasio, 1989)。大量神经影像研究表明，概念表征的神经基础不仅包含感知觉运动等初级皮层区域(Martin, 2016; Ulrich et al., 2023)，还包含了多模态的高水平皮层，这些特定模态区和高水平的多模态区共同存储了语义知识的实际内容(Binder & Desai, 2011)。而左侧角回在跨通道的信息加工中均有激活，表现为高水平语义表征加工(Binder et al., 2009)，同时还参与跨通道语义整合(Bonner et al., 2013; Fernandino et al., 2022)，在语义关系加工中也表现出显著的激活(Zhang, Mirman, et al., 2023)，是语义表征和加工的重要脑区(Graves et al., 2023)。

2.1 左侧角回是高水平语义表征区

大量的研究表明，左侧角回是词汇语义表征的一个重要脑区。脑功能神经影像研究发现，左侧角回在语义任务中的激活比其它任务更强。例如，在视觉研究中，语义任务比非语义任务(包括语音任务、感知觉判断任务、词汇判断任务等)更多激活了左侧角回等语义脑区(Rahimi et al., 2022; Seghier et al., 2010)。在听觉研究中，同样发现了语义任务比非语义任务要更多激活左侧角回脑区(Binder et al., 1999; Price, 2010)。这表明无论词汇以何种形式呈现，左侧角回在语义任务中普遍显示更多的激活，反映了其可能是负责高水平的语义表征。

还有研究发现，真词比假词(Taylor et al., 2014; Wang et al., 2011)，高频词比低频词(Graves et al., 2010)在左侧角回都诱发了更强的激活，该脑区被认为与词汇语义表征相关。因为真词具有词典语义表征，高频词要比低频词更容易通达词典语义表征，从而就更多激活了左侧角回等语义表征相关的脑区。最新的一项研究发现，不同类型的概念都会激活左侧角回脑区。例如，被试在加工代表人物或地点的专有名词和普通名词时，这些词汇均激活了左侧角回(Desai et al., 2023)。

而且，左侧角回对语义特征丰富的词汇加工更加敏感，体现为左侧角回激活的语义可表象性效应和语义具体性效应。词汇的语义可表象性是指词汇唤起心理表象的能力，相对于低可表象性词汇，高可表象性词汇更大程度地激活了左侧角回，表现出语义可表象性效应。左侧角回的可表象性效应在词汇判断(Mattheiss et al., 2018; Roxbury et al., 2014)、语义任务(Lin et al., 2018; Sabsevitz et al., 2005)、阅读任务(Graves et al., 2010)和命名任务(Frost et al., 2005)中都得到了稳健的结果。应用经颅直流电刺激(tDCS)技术的神经调控研究也发现，对左侧角回施加阴极刺激抑制其神经活动之后，被试的阅读任务表现出可表象性效应的显著减弱(Cummine et al., 2019)，该结果为左侧角回对高表象词汇更敏感提供了因果证据。左侧角回对语义特征丰富的词汇加工更敏感还体现为具体词比抽象词诱发了更

大的激活(Binder et al., 2009; Wang et al., 2010)。高可表象词和具体词的加工优势被认为与其更加丰富的语义特征信息有关，左侧角回激活可能反映了对丰富语义特征信息敏感。

总体而言，在不同刺激和语义任务的多个研究中，左侧角回激活都表现出高一致性和可靠性的重复。Binder 等人(2009)对 120 项语义加工的研究进行了元分析，只有符合严格语义对比标准的研究才被纳入，如果对比条件下的刺激在正字法或语音特性上不匹配，或者如果激活可以用注意或工作记忆需求的差异来解释，则研究被排除在外，结果在左侧角回脑区发现了稳定的激活。因此，综合之前的研究发现，左侧角回在多种语义任务中激活，并且在广泛的有意义刺激中参与激活，可能在语义加工网络中起到了高水平语义表征的功能。

2.2 左侧角回与跨模态语义联合表征

左侧角回作为高水平语义表征区，可能具有连接和整合感知觉-运动等多模态特征信息的功能，在整合多种特征信息以形成完整的语义表征中发挥重要作用(Binder & Desai, 2011)。

来自脑损伤病人的研究为左侧角回参与多模态语义表征提供了有效的证据支持。左侧角回受损的患者通常在涉及听觉或者书面语言的语义加工中表现出困难，此类患者存在多模态的语义损伤缺陷，在图词匹配、图片命名、同义词测试、单词分类等任务中，都表现出语义提取功能的损伤(Hart & Gordon, 1990; Jefferies & Lambon Ralph, 2006; Jefferies et al., 2008; Noonan et al., 2010)。例如，在图片描述任务中，患者无法识别物体的颜色或声音，也无法检索到与物体相关的动作知识，表现出语义障碍的跨模态特征(Jefferies & Lambon Ralph, 2006)。

通过操纵词汇的语义模态维度信息，研究者发现左侧角回的激活受到了感知觉-运动模态信息调节，可能对应着跨模态的语义联合表征功能。Bonner 等人(2013)发现左侧角回在所有特定模态相关的具体词(包括视觉模态、声音模态和操作模态)和抽象词中都显示出激活，说明左侧角回作为高水平跨模态表征区，聚合了概念的多种模态信息。随后 Fernandino 等人(2015)收集了 900 个英语名词的大脑激活模式，以及对这些名词的感知觉-运动模态语义属性(包括颜色、形状、视觉运动、声音和操作属性)的评分。研究结果发现大脑皮层外围区域与感知觉-运动系统关联，对其中一个或多个属性较为敏感，而左侧角回与 5 个词汇语义属性都相关。这些证据表明左侧角回表征多种模态信息，可能具有跨模态信息的联合表征功能。

更多的研究证据表明，左侧角回与跨模态语义信息的联合表征有关。研究发现，在行为特征和声音特征词汇的外显语义判断任务中，左侧角回在两种词汇的任务中都参与激活，表现出对跨模态的语义特征敏感(Kuhnke, Kiefer, & Hartwigsen, 2020)。Kuhnke 等人(2021)进一步的功能连接分析发现，高行为特征词汇增加了角回和行为特征表征区(包括左侧初级运动皮层以及右侧后颞上沟)之间的功能连接，高声音特征词汇增加了角回和声音特征表征区(包括左侧前扣带回、右侧下顶叶、双侧背内侧前额叶以及丘脑)之间的功能连接。从而表明左侧角回是多模态语义信息的高水平聚合区，它可能将来自特定模态关联皮层的语义信息整合在一起，形成完整的概念表征。

角回对概念的跨模态信息表征机制，近年来得到了表征相似性分析技术的证据支持。Fernandino 等人(2022)发现概念在角回等脑区是基于感知觉、运动、情

感、时空等经验特征信息进行表征的。Tong 等人(2022)通过构建基于 65 个感知觉、运动、情感等经验维度的概念经验模型，预测 522 个词汇概念的神经相似性结构，结果在角回等皮层区域检测到词汇概念的语义相似性结构，说明这些皮层区域编码概念的多模态经验信息。

2.3 左侧角回加工语义关系

左侧角回的语义信息聚合功能还体现在对语义关系的敏感性激活。语义知识之间的关系是语义空间的关键要素，语义关系可以划分为基于语义特征(感知觉-运动属性等)相似性进行组织的类别系统(例如，狗-熊)，以及基于事件或场景的共现关系组织的主题系统(例如，狗-骨头)(Mirman et al., 2017)。

左侧角回脑区受损的患者往往伴随着图片命名的主题关系错误(Schwartz et al., 2011)，还表现出识别物体之间主题关系的能力损伤(Mirman & Graziano, 2012)。来自健康被试的功能磁共振成像研究也支持了左侧角回对主题关系的敏感性(Zhang, Mirman, et al., 2023)，得到了神经适应范式(Geng & Schnur, 2016)、语义相关性判断(Bedny et al., 2014; Boylan et al., 2017)以及图−词干扰命名任务(de Zubicaray et al., 2013)的证据支持。

左侧角回还对概念的类别加工具有敏感性激活。通过对比生物和非生物概念的脑区激活，研究者发现生物比非生物概念更多激活了左侧角回等脑区(Rundle et al., 2018)。最近的一项研究采用表征相似性分析技术发现，左侧角回不仅对词语的上下文分布特征敏感，也表现出对词语所属的语义类别相似性敏感(Carota et al., 2021)。还有研究采用经颅直流电刺激技术对左侧角回施加阳极或阴极刺激，结果发现相对于伪刺激组，刺激组被试在语义分类任务中的反应速度均有明显降低(Longo et al., 2022)。这些研究证据表明左侧角回具有对语义类别加工的敏感性，由于相同类别的概念共享更多的概念特征，从而需要更多的特征整合加工。例如，在生物类别中，概念之间存在着更多的共有特征，因此不同生物概念的相似性较高，而非生物概念往往具有更多的独特特征，概念之间的相似性较低。相对于非生物来说，生物概念由于彼此之间的相似性而难以区分，识别生物概念可能需要更复杂的语义特征信息整合过程(Taylor et al., 2009)。

左侧角回既对概念语义的主题关系敏感，也对类别关系敏感，可以统一在其独特的解剖结构及其作为语义聚合区的功能。例如，Binder (2016)对包含左侧角回的高水平语义枢纽脑区如何实现类别和主题语义关系加工进行了分析，认为角回作为高水平语义枢纽区具有跨模态联合表征的功能。在联结主义取向下，主题关系被具体化为特征，研究者认为主题关系和类别关系的加工只是依赖的语义特征不同，类别关系与形状、颜色等视觉特征更相关，而主题关系与功能、空间、时间和动作特征更相关(Beauchamp & Martin, 2007; Kuhnke, Beaupain, et al., 2020)。基于类别和基于主题联想的概念关系表征实际上源自多模态系统的信息整合，属于同一类别关系或主题关系的概念往往比无关概念之间的特征信息更加相似，与无关条件相比，角回在类别关系和主题关系条件下诱发的更大激活，可能反映了对重叠语义特征信息的整合。

一些研究结果发现左侧角回的激活与主题关系和类别关系加工均相关。语义性失语症患者的研究发现，这类病人在广泛的语义任务中都有困难，在类别判断/匹配和检索词汇主题联想的测试中均表现出相关错误(Jefferies & Lambon Ralph, 2006)。对左侧角回施加经颅磁刺激虚拟损伤之后，被试在基于类别和基于主题

的图词匹配任务表现均受影响(Davey et al., 2015)。Zhang 等人(2020)利用听自然故事的神经影像数据建立了语义类别和语义关系的皮层表征预测模型，并进一步将其应用于数千个新单词加工中，研究结果发现多种语义类别和语义关系加工中都涉及角回脑区激活。另外，一项脑磁图研究发现，左侧角回脑区在两种关系加工中显示出相似的激活(Lewis et al., 2015)。一项使用表征相似性分析技术的研究也发现，在三个类别(人、人造物体和地点)和三个主题(学校、医学和体育)刺激材料上，左侧角回对类别信息敏感但对主题信息不敏感，但是在控制了类别信息差异后，角回脑区也表现出对主题信息敏感(Xu et al., 2018)。

2.4 左侧角回在词汇语义整合加工中的作用

左侧角回在概念语义表征中起到了高水平语义信息的聚合功能。相应地，在语义通达加工过程，可能对应着语义的整合加工。在词汇水平，表现为从词形通达到语义的整合加工过程；而在更大尺度的短语整合加工中，表现为多种语义信息的整合过程。

在词汇水平，角回被认为负责单词形式和相应意义之间的转换加工。这一观点最初得到了脑损伤患者的证据支持(Mesulam, 1998)，直接的证据来自汉字阅读的神经影像研究。汉字具有表义的特性，为研究从字形到语义加工的神经机制提供了可能。汉字阅读的神经影像研究发现，左侧角回不仅在语义加工中激活，而且在正字法加工中也激活，从而表明左侧角回在正字法到语义映射的功能(Wang et al., 2016)。进一步的元分析发现，左侧角回在汉字加工中显示出比拼音文字更大的激活，这两种类型的文字都能传达意义和声音，但是阅读汉字需要更多的字形加工，基于此，研究者认为左侧角回在汉字加工中可能反映了从字形到语义的映射过程(Zhao et al., 2017)。

在短语水平，左侧角回可能参与了语义组合加工。语义组合是指将单个单词组合成复杂意义的能力。一些研究发现左侧角回属于组合加工网络的一部分，支持将单个概念整合成连贯的语义组合(Molinaro et al., 2015; Pylkkanen, 2020; Zhang et al., 2022)。例如，Price 等人(2015)研究发现被试加工有意义短语组合(“tiny radish”) 比无意义短语组合(“fast blueberry”)更大激活了左侧角回，并且激活不受修饰词感知觉-运动信息类型的调节(Price et al., 2015)。最新研究还发现，在听觉输入模式下，后侧角回在有意义短语和无意义短语都要比假词短语有更强激活，并且在内隐任务和外显任务中显示出稳定激活，说明后侧角回脑区对语义信息数量敏感，与语义丰富性有关，反映了自动化的语义组合加工(Graessner et al., 2021)。左侧角回参与短语组合加工还得到了神经因果研究的证据支持，Price 等人(2016)采用高精度经颅直流电刺激技术对左侧角回施加阳极刺激，结果发现促进了有意义短语更快地识别，从而表明了左侧角回在概念组合加工中的关键作用。

3 左侧角回功能的更多研究

左侧角回在解剖结构上与广泛的脑区具有联结，这一特点可能决定了该脑区同时参与了多种认知加工的神经网络。从而，对于该脑区在语义表征和加工中功能提出了质疑，也使得对左侧角回的功能探讨变得更加复杂。

3.1 左侧角回与前颞叶的语义枢纽功能

角回作为高水平语义表征的聚合区，被研究者认为是语义加工和表征的枢纽脑区。这种观点主要基于 Binder 和 Desai (2011)提出的语义加工具身抽象理论，

该理论认为左侧角回和事件概念的表征有关，负责对感知觉、运动等模态区输入的信息进行整合。但是，基于语义表征的中心-辐射(Hub and Spokes)模型却认为语义表征的唯一跨模态枢纽位于双侧前颞叶脑区，语义加工由特定模态的信息源(spokes)与前颞叶(hub)之间的相互作用形成(Lambon Ralph et al., 2017; Patterson et al., 2007)。

最近，研究者尝试将两个枢纽脑区的功能统一在一个理论模型中。Kuhnke 等人(2023)提出的语义表征混合模型认为，语义加工存在不同层级的高水平枢纽区，角回和前颞叶在语义加工中扮演着不同且互补的角色。概念加工依赖于层级化神经结构，依次需要经过模态特异脑区、多模态脑区，最后到达非模态脑区完成加工。角回是多模态脑区，负责对低水平的特定模态信息进行整合，同时保留了概念相关的模态信息；而左侧前颞叶是更高水平的非模态脑区，将语义模态信息整合到更高水平的抽象表征，而不保留特定模态的信息。该模型强调，模态特异脑区和多模态脑区都以一种灵活的、任务依赖的方式参与概念加工，对与任务相关的概念特征做出选择性反应，而非模态脑区则完全将模态特定的感知运动信息抽象为高度抽象的概念表征，对概念的模态信息不敏感。

左侧角回和前颞叶在语义表征和加工中的功能仍然是研究者广泛关注的问题。研究者尝试从词汇、短语以及句子等不同水平的语义加工，同时还结合语义整合、语法加工等不同的语言加工成分对两个脑区的功能进行探讨(Coutanche et al., 2020; Farahibozorg et al., 2022; Pylkkanen, 2019)。但是目前关于两个脑区在语义加工中的功能贡献还没有一致的结论，未来还需要深入研究。

3.2 左侧角回参与语义控制加工

语义加工需要由语义表征和语义控制系统协作完成，语义控制是一种灵活地获取和操纵语义信息的能力。一些研究认为左侧角回是语义控制网络的一部分(Jefferies, 2013; Jung & Lambon Ralph, 2023)，例如，研究者通过对脑损伤病人研究、健康被试的 fMRI 研究以及 TMS 研究进行综述，认为参与语义控制的关键脑区包括左侧额下回、后颞中回和背侧角回/顶下沟(Jefferies, 2013)。左侧额叶和颞顶叶脑区(包括角回)损伤的中风失语症患者并没有表现出语义知识的丧失，而是在灵活使用和操纵语义信息方面存在功能障碍，这些患者表现出类似的执行控制缺陷，这表明这些皮层网络支撑着语义控制加工(Jefferies & Lambon Ralph, 2006)。患者的语义缺陷随着语义任务控制需求而变化，在检索物体概念常见知识和歧义词主要含义方面表现较好，而在检索物体不常见知识和歧义词次要含义方面受损。从而，研究者认为左侧角回脑区可能与语义执行控制功能有关，负责操纵语义信息产生出适合任务的反应(Corbett et al., 2009; Noonan et al., 2010)。

但是，在正常成人的磁共振研究中，左侧角回是否参与语义执行控制加工还存在着争论。Noonan 等人(2013)对 53 个功能磁共振研究进行元分析发现，高控制需求的语义任务比低控制需求的语义任务更多激活了左侧前背侧角回脑区，表明角回参与了语义信息的控制加工。但是，角回参与语义执行控制的功能受到了一些研究者的质疑。Jackson (2021)采用改进的元分析技术对语义控制网络重新进行探讨，结果却并没有发现左侧角回参与语义控制加工，而是在语义认知网络（语义任务 vs 基线任务、有意义 vs 无意义刺激）中发现角回脑区的激活，研究者认为角回是语义表征脑区，否认角回参与语义控制加工。而且，根据语义执行控制脑区的激活表现，左侧角回应该在更困难的任务中表现出更强的激活，但是最新

的一项 fMRI 研究显示，角回在较难任务中的激活较弱(Kuhnke et al., 2022)。因此，左侧角回究竟是否参与了语义执行控制加工仍然是当前研究者争论的问题。

3.3 左侧角回参与默认模式网络语义加工

之前的研究结果表明，语义加工网络和默认模式网络(DMN)有重叠(Binder et al., 1999; Binder et al., 2009)，DMN 是相对于休息或被动基线状态，在目标导向任务中表现出失活模式的大脑系统，包括内侧前额叶、后扣带回、外侧和内侧颞叶皮层以及后部顶下叶/角回(Raichle et al., 2001; Raichle, 2015)。这些区域在默认模式网络中相互协同工作，形成一个与语义和社会知识加工、情景记忆和自传体记忆检索、内省、记忆等有关的功能网络。左侧角回也是 DMN 网络的核心脑区之一，对于左侧角回在 DMN 中的功能认识，研究者形成了三种不同的观点。一种观点认为 DMN 网络中的角回脑区是语义加工的枢纽脑区。Binder 等人(1999)认为语义加工是静息状态下认知活动的重要组成部分，研究者通过比较静息态、音调感知和语义任务，发现 DMN 网络在静息状态下的激活高于音调感知任务，但是和语义任务下的激活相等，表明静息状态下涉及语义加工。与静息状态相比，左侧角回在语义任务中的失活程度明显低于非语义的知觉或者语音任务(Humphreys et al., 2015; Seghier et al., 2010; Wirth et al., 2011)。甚至当任务涉及语义加工的程度大于静息状态时，角回脑区还显示出正激活(Seghier, 2013)。Xu 等人(2017)发现语义加工的一个网络与 DMN 网络核心脑区重叠，并且该网络中的大多数脑区是多模态语义信息的聚合区，进一步支持了 DMN 网络参与语义加工的观点。

另一种观点则否认角回在 DMN 中起到了语义加工的作用，认为角回的语义效应可能是难度差异导致(Humphreys et al., 2021; Jackson et al., 2019)。研究者在语义相关性判断任务和视觉空间任务中操纵了刺激的难度，结果发现角回脑区没有出现语义任务效应，而是在两种任务上都表现出失活模式，表现为容易条件比困难条件更小的失活(Humphreys & Lambon Ralph, 2017)。最新的一项研究同样发现左侧角回在语义和非语义任务中都表现出困难条件比简单条件的更大失活(Martin et al., 2022)。进而，研究者认为角回在语义>非语义任务、真词>非词等对比中的激活差异可能反映了在更难任务或项目上的负激活更大(Humphreys & Lambon Ralph, 2017; Humphreys et al., 2015)。难度假设得到了 Graves 等人(2017)的研究支持，他们发现角回在真词与非词加工中产生的典型激活差异受刺激难度驱动，导致激活模式发生逆转，即当实验采用更难识别的低频词时，非词条件比真词条件激活了角回脑区。

第三种多功能观点则认为角回可能同时支持语义和非语义加工。有研究者发现即使控制了语义任务和控制任务之间的需求差异，角回等 DMN 网络脑区依旧表现出激活(Wirth et al., 2011)，从而研究者怀疑 DMN 在语义加工中的参与激活不仅仅是由于一般难度差异导致的。例如，Kuhnke 等人(2022)发现任务难度和语义加工在角回表现出可分离的效应：一方面，角回在语义任务比非语义任务的激活更强，对语义信息加工敏感；另一方面，角回在语义和非语义条件下的激活都随着任务难度的增加而降低，可能参与一般的难度加工。而且，最近的一项研究发现，角回的不同子区域具有功能分离，腹侧角回表现出社会语义效应，而背侧角回则表现出对任务难度的敏感(Zhang, Hung, et al., 2023)。由此可见，角回可能同时支持语义加工，也支持一般的任务难度加工。

4 可能的解释

左侧角回在词汇语义加工中表现出多种不同的功能，也存在着广泛的争论。一种可能的原因是角回内部存在结构和功能分离的子区域。角回在结构上被分为前部和后部两个分离的子区域(Caspers et al., 2006; Caspers et al., 2008)。这些子区域和其他脑区之间存在分离的结构和静息态功能连接(Mars et al., 2011; Rushworth et al., 2006; Uddin et al., 2010)。例如，研究者基于纤维束造影技术在角回子区域观察到不同的结构连接模式，其中前背侧角回通过上纵束和腹侧前运动区和额下回后部连接，后腹侧角回通过下纵束和旁海马连接(Rushworth et al., 2006)。另外，研究者采用静息态功能连接分析也揭示了角回内部子区域和其他脑区之间的不同链接，研究结果显示前背侧角回与腹侧前运动区和腹外侧前额叶皮层连接更强，后腹侧角回与内侧前额叶皮层、后扣带回、楔前叶和海马回的连接更强(Mars et al., 2011; Uddin et al., 2010)。这些研究结果共同揭示了角回内部子区域结构和功能连接的复杂性，这意味着角回子区域可能具有不同的功能。

事实上，一些研究者已经提出了角回子区域的功能细分(Kuhnke et al., 2022; Noonan et al，2013; Seghier, 2013)。有研究发现，后腹侧角回可能与语义表征相关，而前背侧角回更多参与语义执行控制加工。例如，一项神经影像学元分析发现，背侧角回激活随着语义任务执行需求增加而增加，而腹侧角回在语义和语音任务对比中显示出更大激活，但对控制需求不敏感(Noonan et al，2013)。类似的，Jefferies (2013)认为背侧角回参与语义执行控制加工，而腹侧角回则负责语义整合加工。然而，最近的一项研究发现前背侧角回表现出普遍领域的加工难度效应，但这种难度效应与控制加工的反应模式不同，激活与难度之间呈负相关，即激活随着任务难度的增加而降低。因此，研究者认为前背侧角回与语义执行控制加工无关(Kuhnke et al., 2022)。Seghier 等人(2010)研究则通过直接对比默认模式网络和语义加工网络，发现两个网络重叠区位于中部左侧角回，因此将角回划分为三个子区域。首先是两个网络重叠的中部角回脑区，该脑区显示出所有类型刺激驱使的失活，并且失活水平和语义联想水平成正相关，说明中部角回可能参与在各种类型刺激的语义联想加工中；其次是位于重叠区背侧和腹侧的角回子区域，研究者发现与注视符基线条件对比，背、腹侧角回均在语义任务中表现出显著激活，说明这两个子区涉及在刺激驱使的语义加工中。背、腹侧角回之间的功能区别在于，对于背侧角回脑区，语义任务和无语义的感知觉判断任务均比基线条件激活更大，这表明无论视觉呈现的刺激条件是否具有明确意义，背侧角回脑区都进行了语义检索加工，负责在所有视觉刺激中检索语义信息。而腹侧角回脑区在语义判断任务中显示出激活，在感知觉判断任务中表现出负激活，研究者认为腹侧角回可能涉及在视觉输入的概念识别加工中(Seghier et al., 2010)。虽然这些研究关注了角回子区域在语义加工中的功能，但是，对于角回子区域在语义加工中的贡献还不够清楚，研究者还需要深入探究角回子区域在语义加工中的功能，在未来的神经影像学研究中，对角回脑区的报告也需要更为精确的定位。

另一种原因可能是角回作为跨系统的连接器支持语义加工的多个方面。这与 Xu 等人提出的语义加工三网络神经认知模型观点一致，研究者将语义系统划分为三个子系统：基于多模态经验的语义表征系统、语言支持的语义表征系统以及语义控制系统。研究者发现左侧角回作为中心连接枢纽，连接三个语义子系统，

这表明语义信息加工通过角回进行连接、转换和整合。研究者还发现这三个语义模块的内部枢纽位于角回的子区域，左侧角回子区域具有明确功能划分，其中前部角回参与语言支持的语义表征加工，后部角回支持基于多模态经验的语义表征加工，而背部角回则与语义执行控制加工有关，这表示每个模块的信息在角回的子区域进行整合(Xu et al., 2017; Xu et al., 2016)。此外，角回在默认模式网络中的核心地位也支持了其作为跨系统连接器的功能，因为默认模式网络与广泛的认知功能相关，包括语义和社会知识加工、情景记忆和自传体记忆检索、内省、记忆等(Spreng et al., 2010)。左侧角回作为不同语义系统的连接枢纽，它与每个网络之间保持着密切的联系，因此，左侧角回在语义加工中的功能可能依赖于它与其他脑区之间的相互作用。未来的研究可以考察不同角回区域如何与其他核心语义脑区相互作用，这有助于从网络的角度深入理解角回在语义加工中的功能。

5 结论

总之，左侧角回在词汇语义加工中扮演着重要角色。当前的研究探索了左侧角回在语义加工中的“聚合区”功能，但是还存在着争论并没有得到一致的结论。未来的研究还需要对角回在语义加工中的功能进行深入探索。

参考文献

[1] Beauchamp, M. S., & Martin, A. (2007). Grounding object concepts in perception and action: evidence from fMRI studies of tools. *Cortex*, *43*(3), 461–468.

[2] Bedny, M., Dravida, S., & Saxe, R. (2014). Shindigs, brunches, and rodeos: the neural basis of event words. *Cognitive, Affective, & Behavioral Neuroscience*, *14*(3), 891–901.

[3] Binder, J. R. (2016). In defense of abstract conceptual representations. *Psychonomic Bulletin and Review*, *23*(4), 1096–1108.

[4] Binder, J. R., & Desai, R. H. (2011). The neurobiology of semantic memory. *Trends in Cognitive Sciences*, *15*(11), 527–536.

[5] Binder, J. R., Desai, R. H., Graves, W. W., & Conant, L. L. (2009). Where is the semantic system? A critical review and meta-analysis of 120 functional neuroimaging studies. *Cerebral Cortex*, *19*(12), 2767–2796.

[6] Binder, J. R., Frost, J. A., Hammeke, T. A., Bellgowan, P., Rao, S. M., & Cox, R. W. (1999). Conceptual processing during the conscious resting state: A functional MRI study. *Journal of Cognitive Neuroscience*, *11*(1), 80–93.

[7] Bonner, M. F., Peelle, J. E., Cook, P. A., & Grossman, M. (2013). Heteromodal conceptual processing in the angular gyrus. *Neuroimage*, *71*, 175–186.

[8] Boylan, C., Trueswell, J. C., & Thompson-Schill, S. L. (2017). Relational vs. attributive interpretation of nominal compounds differentially engages angular gyrus and anterior temporal lobe. *Brain and Language*, *169*, 8–21.

[9] Carota, F., Nili, H., Pulvermuller, F., & Kriegeskorte, N. (2021). Distinct fronto-temporal substrates of distributional and taxonomic similarity among words: Evidence from RSA of BOLD signals. *Neuroimage*, *224*, 117408.

[10] Caspers, S., Eickhoff, S. B., Geyer, S., Scheperjans, F., Mohlberg, H., Zilles, K., & Amunts, K. (2008). The human inferior parietal lobule in stereotaxic space. *Brain Structure and Function*, *212*(6), 481–495.

[11] Caspers, S., Geyer, S., Schleicher, A., Mohlberg, H., Amunts, K., & Zilles, K. (2006). The human inferior

parietal cortex: Cytoarchitectonic parcellation and interindividual variability. *Neuroimage*, *33*(2), 430–448.

[12] Corbett, F., Jefferies, E., & Ralph, M. A. (2009). Exploring multimodal semantic control impairments in semantic aphasia: Evidence from naturalistic object use. *Neuropsychologia*, *47*(13), 2721–2731.

[13] Coutanche, M. N., Solomon, S. H., & Thompson--Schill, S. L. (2020). Conceptual combination. In D. Poeppel, G. R. Mangun, & M. S. Gazzaniga (Eds.), The cognitive neurosciences, 6th edition (pp. 827–836). Boston, MA: MIT Press.

[14] Croce, P., Spadone, S., Zappasodi, F., Baldassarre, A., & Capotosto, P. (2021). rTMS affects EEG microstates dynamic during evoked activity. *Cortex*, *138*, 302–310.

[15] Cummine, J., Boliek, C. A., McKibben, T., Jaswal, A., & Joanisse, M. F. (2019). Transcranial direct current stimulation (tDCS) selectively modulates semantic information during reading. *Brain and Language*, *188*, 11–17.

[16] Damasio, A. R. (1989). Time-locked multiregional retroactivation: A systems-level proposal for the neural substrates of recall and recognition. *Cognition*, *33*(1-2), 25–62.

[17] Davey, J., Cornelissen, P. L., Thompson, H. E., Sonkusare, S., Hallam, G., Smallwood, J., & Jefferies, E. (2015). Automatic and controlled semantic retrieval: TMS reveals distinct contributions of posterior middle temporal gyrus and angular gyrus. *Journal of Neuroscience*, *35*(46), 15230–15239.

[18] de Zubicaray, G. I., Hansen, S., & McMahon, K. L. (2013). Differential processing of thematic and categorical conceptual relations in spoken word production. *Journal of Experimental Psychology: General*, *142*(1), 131.

[19] Desai, R. H., Tadimeti, U., & Riccardi, N. (2023). Proper and common names in the semantic system. *Brain Structure and Function*, *228*(1), 239–254.

[20] Farahibozorg, S. R., Henson, R. N., Woollams, A. M., & Hauk, O. (2022). Distinct roles for the anterior temporal lobe and angular gyrus in the spatio-temporal cortical semantic network. *Cerebral Cortex, 32*(20), 4549–4564

[21] Fernandino, L., Binder, J. R., Desai, R. H., Pendl, S. L., Humphries, C. J., Gross, W. L., Conant, L. L., & Seidenberg, M. S. (2015). Concept representation reflects multimodal abstraction: a framework for embodied semantics. *Cerebral Cortex*, *26*(5), 2018–2034.

[22] Fernandino, L., Tong, J. Q., Conant, L. L., Humphries, C. J., & Binder, J. R. (2022). Decoding the information structure underlying the neural representation of concepts. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, *119*(6), e2108091119.

[23] Frey, S., Campbell, J. S., Pike, G. B., & Petrides, M. (2008). Dissociating the human language pathways with high angular resolution diffusion fiber tractography. *Journal of Neuroscience*, *28*(45), 11435–11444.

[24] Frost, S. J., Mencl, W. E., Sandak, R., Moore, D. L., Rueckl, J. G., Katz, L., Fulbright, R. K., & Pugh, K. R. (2005). A functional magnetic resonance imaging study of the tradeoff between semantics and phonology in reading aloud. *Neuroreport*, *16*(6), 621–624.

[25] Geng, J., & Schnur, T. T. (2016). Role of features and categories in the organization of object knowledge: Evidence from adaptation fMRI. *Cortex*, *78*, 174–194.

[26] Graessner, A., Zaccarella, E., & Hartwigsen, G. (2021). Differential contributions of left-hemispheric language regions to basic semantic composition. *Brain Structure and Function*, *226*(2), 501–518.

[27] Graves, W. W., Boukrina, O., Mattheiss, S. R., Alexander, E. J., & Baillet, S. (2017). Reversing the standard neural signature of the word-nonword distinction. *Journal of Cognitive Neuroscience*, *29*(1), 79–94.

[28] Graves, W. W., Desai, R., Humphries, C., Seidenberg, M. S., & Binder, J. R. (2010). Neural systems for

reading aloud: a multiparametric approach. *Cerebral Cortex*, *20*(8), 1799–1815.

[29] Graves, W. W., Purcell, J., Rothlein, D., Bolger, D. J., Rosenberg-Lee, M., & Staples, R. (2023). Correspondence between cognitive and neural representations for phonology, orthography, and semantics in supramarginal compared to angular gyrus. *Brain Structure and Function*, *228*(1), 255–271.

[30] Guevara, M., Guevara, P., Roman, C., & Mangin, J. F. (2020). Superficial white matter: A review on the dMRI analysis methods and applications. *Neuroimage*, *212*, 116673.

[31] Hart, J., & Gordon, B. (1990). Delineation of single-word semantic comprehension deficits in aphasia, with anatomical correlation. *Annals of Neurology: Official Journal of the American Neurological Association and the Child Neurology Society, 27*(3), 226–231.

[32] Humphreys, G. F., Hoffman, P., Visser, M., Binney, R. J., & Lambon Ralph, M. A. (2015). Establishing task- and modality-dependent dissociations between the semantic and default mode networks. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, *112*(25), 7857–7862.

[33] Humphreys, G. F., & Lambon Ralph, M. A. (2017). Mapping domain-selective and counterpointed domain-general higher cognitive functions in the lateral parietal cortex: Evidence from fMRI comparisons of difficulty-varying semantic versus visuo-spatial tasks, and functional connectivity analyses. *Cerebral Cortex*, *27*(8), 4199–4212.

[34] Humphreys, G. F., Lambon Ralph, M. A., & Simons, J. S. (2021). A unifying account of angular gyrus contributions to episodic and semantic cognition. *Trends in Neurosciences*, *44*(6), 452–463.

[35] Jackson, R. L. (2021). The neural correlates of semantic control revisited. *Neuroimage*, *224*, 117444.

[36] Jackson, R. L., Cloutman, L. L., & Lambon Ralph, M. A. (2019). Exploring distinct default mode and semantic networks using a systematic ICA approach. *Cortex*, *113*, 279-297.

[37] Jefferies, E. (2013). The neural basis of semantic cognition: Converging evidence from neuropsychology, neuroimaging and TMS. *Cortex*, *49*(3), 611–625.

[38] Jefferies, E., & Lambon Ralph, M. A. (2006). Semantic impairment in stroke aphasia versus semantic dementia: A case-series comparison. *Brain*, *129*(Pt 8), 2132–2147.

[39] Jefferies, E., Patterson, K., & Ralph, M. A. L. (2008). Deficits of knowledge versus executive control in semantic cognition: Insights from cued naming. *Neuropsychologia, 46*(2), 649–658.

[40] Jung, J., & Lambon Ralph, M. A. (2023). Distinct but cooperating brain networks supporting semantic cognition. *Cereb Cortex, 33*(5), 2021–2036.

[41] Kuhnke, P., Beaupain, M. C., Arola, J., Kiefer, M., & Hartwigsen, G. (2023). Meta-analytic evidence for a novel hierarchical model of conceptual processing. *Neuroscience and Biobehavioral Reviews*, *144*, 104994.

[42] Kuhnke, P., Beaupain, M. C., Cheung, V. K. M., Weise, K., Kiefer, M., & Hartwigsen, G. (2020). Left posterior inferior parietal cortex causally supports the retrieval of action knowledge. *Neuroimage*, *219*, 117041.

[43] Kuhnke, P., Chapman, C. A., Cheung, V. K. M., Turker, S., Graessner, A., Martin, S., Williams, K. A., & Hartwigsen, G. (2022). The role of the angular gyrus in semantic cognition: a synthesis of five functional neuroimaging studies. *Brain Structure and Function*, *228*(1), 273–291.

[44] Kuhnke, P., Kiefer, M., & Hartwigsen, G. (2020). Task-dependent recruitment of modality-specific and multimodal regions during conceptual processing. *Cerebral Cortex*, *30*(7), 3938–3959.

[45] Kuhnke, P., Kiefer, M., & Hartwigsen, G. (2021). Task-dependent functional and effective connectivity during conceptual processing. *Cerebral Cortex*, *31*(7), 3475–3493.

[46] Lambon Ralph, M. A., Jefferies, E., Patterson, K., & Rogers, T. T. (2017). The neural and computational bases of semantic cognition. *Nature reviews neuroscience*, *18*(1), 42–55.

[47] Lewis, G. A., Poeppel, D., & Murphy, G. L. (2015). The neural bases of taxonomic and thematic conceptual relations: An MEG study. *Neuropsychologia*, *68*, 176–189.

[48] Lin, N., Wang, X., Xu, Y., Wang, X., Hua, H., Zhao, Y., & Li, X. (2018). Fine subdivisions of the semantic network supporting social and sensory-motor semantic processing. *Cerebral Cortex*, *28*(8), 2699–2710.

[49] Longo, F., Braun, M., Hutzler, F., & Richlan, F. (2022). Impaired semantic categorization during transcranial direct current stimulation of the left and right inferior parietal lobule. *Journal of Neurolinguistics*, *62*, 101058.

[50] Makris, N., Papadimitriou, G. M., Kaiser, J. R., Sorg, S., Kennedy, D. N., & Pandya, D. N. (2009). Delineation of the middle longitudinal fascicle in humans: a quantitative, in vivo, DT-MRI study. *Cerebral Cortex*, *19*(4), 777–785.

[51] Mars, R. B., Jbabdi, S., Sallet, J., O'Reilly, J. X., Croxson, P. L., Olivier, E., Noonan, M. P., Bergmann, C., Mitchell, A. S., Baxter, M. G., Behrens, T. E., Johansen-Berg, H., Tomassini, V., Miller, K. L., & Rushworth, M. F. (2011). Diffusion-weighted imaging tractography-based parcellation of the human parietal cortex and comparison with human and macaque resting-state functional connectivity. *Journal of Neuroscience*, *31*(11), 4087–4100.

[52] Martin, A. (2016). GRAPES-Grounding representations in action, perception, and emotion systems: How object properties and categories are represented in the human brain. *Psychonomic Bulletin and Review*, *23*(4), 979–990.

[53] Martin, S., Saur, D., & Hartwigsen, G. (2022). Age-dependent contribution of domain-general networks to semantic cognition. *Cerebral Cortex*, *32*(4), 870–890.

[54] Mattheiss, S. R., Levinson, H., & Graves, W. W. (2018). Duality of function: Activation for meaningless nonwords and semantic codes in the same brain areas. *Cerebral Cortex*, *28*(7), 2516–2524.

[55] Mesulam, M.-M. (1998). From sensation to cognition. *Brain*, *121*(6), 1013–1052.

[56] Mirman, D., & Graziano, K. M. (2012). Damage to temporo-parietal cortex decreases incidental activation of thematic relations during spoken word comprehension. *Neuropsychologia*, *50*(8), 1990–1997.

[57] Mirman, D., Landrigan, J. F., & Britt, A. E. (2017). Taxonomic and thematic semantic systems. *Psychological Bulletin*, *143*(5), 499–520.

[58] Molinaro, N., Paz-Alonso, P. M., Dunabeitia, J. A., & Carreiras, M. (2015). Combinatorial semantics strengthens angular-anterior temporal coupling. *Cortex*, *65*, 113–127.

[59] Nakajima, R., Kinoshita, M., Shinohara, H., & Nakada, M. (2020). The superior longitudinal fascicle: Reconsidering the fronto-parietal neural network based on anatomy and function. *Brain Imaging and Behavior,* *14*(6), 2817–2830.

[60] Niu, M., & Palomero-Gallagher, N. (2023). Architecture and connectivity of the human angular gyrus and of its homolog region in the macaque brain. *Brain Structure and Function*, *228*(1), 47–61.

[61] Noonan, K. A., Jefferies, E., Corbett, F., & Ralph, M. A. L. (2010). Elucidating the nature of deregulated semantic cognition in semantic aphasia: evidence for the roles of prefrontal and temporo-parietal cortices. *Journal of Cognitive Neuroscience*, *22*(7), 1597–1613.

[62] Noonan, K. A., Jefferies, E., Visser, M., & Lambon Ralph, M. A. (2013). Going beyond inferior prefrontal involvement in semantic control: Evidence for the additional contribution of dorsal angular gyrus and posterior middle temporal cortex. *Journal of Cognitive Neuroscience*, *25*(11), 1824–1850.

[63] Patterson, K., Nestor, P. J., & Rogers, T. T. (2007). Where do you know what you know? The representation of semantic knowledge in the human brain. *Nature Reviews Neuroscience*, *8*(12), 976–987.

[64] Petit, L., Ali, K. M., Rheault, F., Bore, A., Cremona, S., Corsini, F., De Benedictis, A., Descoteaux, M., & Sarubbo, S. (2023). The structural connectivity of the human angular gyrus as revealed by microdissection and diffusion tractography. *Brain Structure and Function*, *228*(1), 103–120.

[65] Price, A. R., Bonner, M. F., Peelle, J. E., & Grossman, M. (2015). Converging evidence for the neuroanatomic basis of combinatorial semantics in the angular gyrus. *Journal of Neuroscience*, *35*(7), 3276–3284.

[66] Price, A. R., Peelle, J. E., Bonner, M. F., Grossman, M., & Hamilton, R. H. (2016). Causal evidence for a mechanism of semantic integration in the angular gyrus as revealed by high-definition transcranial direct current stimulation. *Journal of Neuroscience*, *36*(13), 3829–3838.

[67] Price, C. J. (2010). The anatomy of language: a review of 100 fMRI studies published in 2009. *Annals of the New Youk Academy of Sciences*, *1191*, 62–88.

[68] Pylkkanen, L. (2019). The neural basis of combinatory syntax and semantics. *Science*, *366*(6461), 62–66.

[69] Pylkkanen, L. (2020). Neural basis of basic composition: what we have learned from the red-boat studies and their extensions. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, *375*(1791), 20190299.

[70] Rahimi, S., Farahibozorg, S. R., Jackson, R., & Hauk, O. (2022). Task modulation of spatiotemporal dynamics in semantic brain networks: An EEG/MEG study. *Neuroimage*, *246*, 118768.

[71] Raichle, M. E. (2015). The brain's default mode network. *Annual Review of Neuroscience*, *38*, 433–447.

[72] Raichle, M. E., MacLeod, A. M., Snyder, A. Z., Powers, W. J., Gusnard, D. A., & Shulman, G. L. (2001). A default mode of brain function. *Proceedings of the National Academy of Sciences, 98*(2), 676–682.

[73] Roxbury, T., McMahon, K., & Copland, D. A. (2014). An fMRI study of concreteness effects in spoken word recognition. *Behavioral and Brain Functions*, *10*(1), 34.

[74] Rundle, M. M., Coch, D., Connolly, A. C., & Granger, R. H. (2018). Dissociating frequency and animacy effects in visual word processing: An fMRI study. *Brain and Language*, *183*, 54–63.

[75] Rushworth, M. F., Behrens, T. E., & Johansen-Berg, H. (2006). Connection patterns distinguish 3 regions of human parietal cortex. *Cerebral Cortex*, *16*(10), 1418–1430.

[76] Sabsevitz, D. S., Medler, D. A., Seidenberg, M., & Binder, J. R. (2005). Modulation of the semantic system by word imageability. *Neuroimage*, *27*(1), 188–200.

[77] Sarubbo, S., De Benedictis, A., Maldonado, I. L., Basso, G., & Duffau, H. (2013). Frontal terminations for the inferior fronto-occipital fascicle: Anatomical dissection, DTI study and functional considerations on a multi-component bundle. *Brain Structure and Function*, *218*(1), 21–37.

[78] Schwartz, M. F., Kimberg, D. Y., Walker, G. M., Brecher, A., Faseyitan, O. K., Dell, G. S., Mirman, D., & Coslett, H. B. (2011). Neuroanatomical dissociation for taxonomic and thematic knowledge in the human brain. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, *108*(20), 8520–8524.

[79] Seghier, M. L. (2013). The angular gyrus: multiple functions and multiple subdivisions. *Neuroscientist*, *19*(1), 43–61.

[80] Seghier, M. L. (2022). Multiple functions of the angular gyrus at high temporal resolution. *Brain Structure and Function*, *228*(1), 7–46

[81] Seghier, M. L., Fagan, E., & Price, C. J. (2010). Functional subdivisions in the left angular gyrus where the semantic system meets and diverges from the default network. *The Journal of Neuroscience*, *30*(50), 16809–16817.

[82] Spreng, R. N., Stevens, W. D., Chamberlain, J. P., Gilmore, A. W., & Schacter, D. L. (2010). Default network activity, coupled with the frontoparietal control network, supports goal-directed cognition. *Neuroimage, 53*(1), 303–317.

[83] Taylor, J. S., Rastle, K., & Davis, M. H. (2014). Interpreting response time effects in functional imaging studies. *Neuroimage*, *99*, 419–433.

[84] Taylor, K. I., Stamatakis, E. A., & Tyler, L. K. (2009). Crossmodal integration of object features: voxel-based correlations in brain-damaged patients. *Brain*, *132*(Pt 3), 671–683.

[85] Tong, J., Binder, J. R., Humphries, C., Mazurchuk, S., Conant, L. L., & Fernandino, L. (2022). A distributed network for multimodal experiential representation of concepts. *Journal of Neuroscience*, *42*(37), 7121–7130.

[86] Turken, A. U., & Dronkers, N. F. (2011). The neural architecture of the language comprehension network: converging evidence from lesion and connectivity analyses. *Frontiers in Systems Neuroscience*, *5*, 1.

[87] Uddin, L. Q., Supekar, K., Amin, H., Rykhlevskaia, E., Nguyen, D. A., Greicius, M. D., & Menon, V. (2010). Dissociable connectivity within human angular gyrus and intraparietal sulcus: Evidence from functional and structural connectivity. *Cerebral Cortex*, *20*(11), 2636–2646.

[88] Ulrich, M., Harpaintner, M., Trumpp, N. M., Berger, A., & Kiefer, M. (2023). Academic training increases grounding of scientific concepts in experiential brain systems. *Cerebral Cortex*, *33*(9), 5646–5657.

[89] Vavassori, L., Sarubbo, S., & Petit, L. (2021). Hodology of the superior longitudinal system of the human brain: A historical perspective, the current controversies, and a proposal. *Brain Structure and Function*, *226*(5), 1363–1384.

[90] Wang, J., Conder, J. A., Blitzer, D. N., & Shinkareva, S. V. (2010). Neural representation of abstract and concrete concepts: A meta-analysis of neuroimaging studies. *Humman Brain Mapping*, *31*(10), 1459–1468.

[91] Wang, X., Yang, J., Shu, H., & Zevin, J. D. (2011). Left fusiform BOLD responses are inversely related to word-likeness in a one-back task. *Neuroimage*, *55*(3), 1346–1356.

[92] Wang, X., Zhao, R., Zevin, J. D., & Yang, J. (2016). The neural correlates of the interaction between semantic and phonological processing for Chinese character reading. *Frontiers in Psychology*, *7*, 947.

[93] Wirth, M., Jann, K., Dierks, T., Federspiel, A., Wiest, R., & Horn, H. (2011). Semantic memory involvement in the default mode network: a functional neuroimaging study using independent component analysis. *Neuroimage*, *54*(4), 3057–3066.

[94] Xu, Y., He, Y., & Bi, Y. (2017). A tri-network model of human semantic processing. *Frontiers in psychology*, *8*, 1538.

[95] Xu, Y., Lin, Q., Han, Z., He, Y., & Bi, Y. (2016). Intrinsic functional network architecture of human semantic processing: Modules and hubs. *Neuroimage*, 132, 542–555.

[96] Xu, Y., Wang, X., Wang, X., Men, W., Gao, J. H., & Bi, Y. (2018). Doctor, Teacher, and Stethoscope: Neural representation of different types of semantic relations. *Journal of Neuroscience*, *38*(13), 3303–3317.

[97] Yakar, F., Celtikci, P., Dogruel, Y., Egemen, E., & Gungor, A. (2023). The connectivity-based parcellation of the angular gyrus: fiber dissection and MR tractography study. *Brain Structure and Function*, *228*(1), 121–130.

[98] Zhang, G., Hung, J., & Lin, N. (2023). Coexistence of the social semantic effect and non-semantic effect in the default mode network. *Brain Structure and Function*, *228*(1), 321–339.

[99] Zhang, W., Xiang, M., & Wang, S. (2022). The role of left angular gyrus in the representation of linguistic composition relations. *Humman Brain Mapping, 43*(7):2204–2217.

[100] Zhang, Y., Han, K., Worth, R., & Liu, Z. (2020). Connecting concepts in the brain by mapping cortical representations of semantic relations. *Nature Communications*, *11*(1), 1–13.
[101] Zhang, Y., Mirman, D., & Hoffman, P. (2023). Taxonomic and thematic relations rely on different types of semantic features: Evidence from an fMRI meta-analysis and a semantic priming study. *Brain and Language*, *242*, 105287.
[102] Zhao, R., Fan, R., Liu, M. X., Wang, X. J., & Yang, J. F. (2017). Rethinking the function of brain regions for reading Chinese characters in a meta-analysis of fMRI studies. *Journal of Neurolinguistics*, *44*, 120–133.

The role of the left Angular Gyrus in lexical-semantic processing

ZHANG Xiangyang, WANG Xiaojuan, YANG Jianfeng
(School of Psychology, Shaanxi Normal University, Xi'an 710062, China)

Abstract The left Angular Gyrus (LAG) is a critical brain region for semantic processing in the cognitive neuroscience of language. Increasing attention has been paid to the function of LAG in lexical-semantic processing since its function has not been consistently understood. Anatomically, the LAG is located at the junction of the temporal, occipital, and parietal lobes, with extensive white matter fiber bundles, determining that it may integrate information across regions. Researchers have proposed the LAG as the "convergence zone" in semantic representation and processing, as it is activated in high-level semantic representation, conjunctive representation of modalities and feature information, semantic relationship representation, and semantic integration processing. However, there are still debates about the LAG regarding the semantic representation hub, semantic executive control processing, and semantic processing of the default mode network. Future studies should comprehensively consider its anatomical basis and connections with a wide range of brain regions, and conduct in-depth and detailed discussions on the function of the LAG subregion.

Keywords left Angular Gyrus, semantic representation, semantic processing, "convergence zone"

作者贡献声明[作者贡献可分为以下内容：1）研究命题的提出、设计，包括某个具体观点或方法的提出；2）研究过程的实施，例如进行试验或调查；3）数据的获取、提供与分析；4）论文起草或最终版本修订。每个研究论文可以根据自己研究活动的特点进一步详细表述作者贡献。有些研究活动可能还涉及其他研究工作和贡献，可以进一步具体表述。在有多个作者署名的论文中，在论文最后必须注明每个作者在上述四个方面中的具体贡献。]

张向阳：研究命题的提出、论文起草；
王小娟：研究命题的提出、论文最终版本修订；
杨剑峰：研究命题的提出、论文最终版本修订。